

Benetzungsverhalten von Verglasungen bei Bewitterung:

Beschichtungen unter der Lupe

Hans Joachim Gläser

In den letzten Jahren ist das witterungsbedingte Benetzungsverhalten von Glasoberflächen sowie deren Selbstreinigungsmöglichkeiten in den Blickpunkt des Interesses gerückt. Im folgenden Beitrag wird auf das Tau- und Reifbeschlagverhalten sowie auf das Benetzungsverhalten bei Regen von Glasoberflächen mit und ohne die Oberflächenenergie verändernden Beschichtungen eingegangen.

Witterungseinflüsse auf Glasoberflächen

Regen: Eine Möglichkeit der Benetzung ist durch Regen, bei dem die Verglasungsoberfläche durch auftreffende Wassertropfen je nach Niederschlagsmenge mehr oder weniger geschwemmt wird.

Taubeschlag: Die beiden anderen Möglichkeiten sind Tau- und Reifbeschlag, hervorgerufen durch Kondensation, d. h. einer Abscheidung von Luftfeuchtigkeit auf der Verglasungsoberfläche. Diese tritt immer dann auf, wenn die Außenoberflächentemperatur t_0 kleiner oder gleich der Taupunkttemperatur t_{tau} entsprechend der relativen Luftfeuchtigkeit der Außenraumluft ist.

Reifbeschlag: Dieser kann nur auftreten, wenn zusätzlich $t_0 \leq 0^\circ\text{C}$ ist. [2].

Versuchsanordnung

Für die Untersuchungen wurden in Gummersbach auf einem nach Süden ausgerichteten Dachfenster mit einer Neigung von 30° auf einer „iplus R“-Verglasung mit einem U_g -Wert (laut Herstellerangabe) von $0,9\text{ W/m}^2\text{K}$ Versuchsscheiben mit der Abmessung $10 \times 10\text{ cm}^2$ auf der Außenoberfläche exponiert.

Es wurden zwei Versuchsserien durchgeführt. Bei der ersten Serie (Februar bis September 2002) wurden zwei Floatscheiben (jeweils Luft- und Badseite zum Außenraum) bzw. eine „K-Glass“-, eine „K-Glass S“ (poliertes „K-Glass“)- und zwei „Activ“-Scheiben jeweils mit der Schicht zum Außenraum exponiert. Die Versuchsscheiben wurden am Rande mit einem handelsüblichen 1K-Silikon-Kleber auf der Fensterverglasung

fixiert. Die Schicht des „K-Glass“ besteht aus einer niedrigemittierenden Zinnoxidschicht ($\text{SnO}_2\text{:F}$), die des „Activ“ aus einer photokatalytischen Titandioxid-Schicht mit Kontaktwinkeln nach UV-Bestrahlung gegenüber Wasser kleiner 5° .

Bei der zweiten Versuchsserie (Bild 1), ab Februar 2003, wurden eine Floatglasscheibe mit der Luftseite zum Außenraum, eine Borosilikat-, eine „K-Glass“-, eine „Activ“-Scheibe sowie eine „K-Glass“-Scheibe mit zusätzlich hydrophober Abdeckschicht jeweils wiederum mit der Schicht zum Außenraum exponiert. Bei der hydrophoben Abdeckschicht handelte es sich um eine mit CFn-Gruppen modifizierte Siliziumoxidschicht („Antisoil“), die nach Herstellerangabe einen Kontaktwinkel gegenüber Wasser von ca. 120° hat. Die Versuchsscheiben wurden bei der zweiten Versuchsserie mit einem MS-Polymer („Rotabond“) auf der Verglasung fixiert. Das thermische Emissionsvermögen der „K-Glass“-Scheiben betrug in allen Fällen – auch mit hydrophober Abdeckschicht – ca. 0,17, das der „Activ“-, Borosilikat- und Floatglas-Scheiben 0,88 bis 0,84.

Die unterschiedlichen Benetzungssituationen wurden mit einer Fotokamera aufgenommen und visuell beurteilt. Durch die gleiche Bewitterung der jeweils exponierten Scheiben über eine vorgegebene Expositionszeit ist ein direkter Vergleich des Einflusses der Bewitterung auf die unterschiedlichen Verglasungen möglich.

Verhalten bei Taubeschlag

Unter entsprechenden Witterungsbedingungen wies die Float- und Borosilikatscheibe sowie die „Activ“-Scheibe Taubeschlag auf, erkennbar an der Transparenz der Scheiben.

Die „K-Glass“- sowie „K-Glass“-Scheibe mit hydrophober Abdeckschicht („Antisoil“) blieben unter den gleichen klimatischen Bedingungen jedoch beschlagfrei, d. h. transparent (analoges Benetzungsbild wie bei Reifbeschlag, Bild 3). Die Ursache des unterschiedlichen Verhaltens ist, daß beide zum Außenraum angeordnete „K-Glass“-Schichten (mit und ohne Abdeckschicht) wegen des geringen thermischen Emissionsvermögens von ca. 0,17 gegenüber der Float-, Borosilikat- und „Activ“-Oberfläche mit einem Emissionsvermögen über 0,80 weniger Wärme an den (klaren) Himmel abstrahlen und somit deren Oberflächentemperaturen im Gegensatz zu denen der drei anderen Scheiben nicht unter die Taupunkttemperatur absinkt. Bemerkenswert ist, daß die hydrophobe Abdeckschicht das thermische Emissionsvermögen der „K-Glass“-Schicht nicht wesentlich beeinflußt, sie muß also im fernen Infrarot nahezu transparent sein. Zum Verhalten beider „K-Glass“-Scheiben muß angemerkt werden, daß auch bei ihnen Taubeschlag auftreten kann, wenn die relative Feuchtigkeit der Außenluft sehr hoch ist (Bild 2).

Letzteres ist immer dann zu beobachten, wenn die Taupunkttemperatur t_{tau} durch sehr hohe Luftfeuchtigkeit so niedrig ist, daß das thermische Emissionsvermögen der Schichten nicht ausreicht um die Wärmeabstrahlung an den Himmel genügend zu unterbinden. D. h., die Außenoberflächentemperatur der Verglasung t_0 sinkt dann unter die Taupunkttemperatur t_{tau} . Durch Schichten mit thermischem Emissionsvermögen unter 0,1 kann aber auch hier der Taubeschlag unterbunden werden [3]. Eine Taubeschlagstatistik für Oberflächen mit einem thermischen Emissionsvermögen von 0,17 bzw. 0,84 unter gleichen klimatischen Bedingungen ist im Literaturzitat [4] nachzulesen. Es konnte bei früheren Untersuchungen nachgewiesen werden, daß

Unterschiedliche Verschmutzung bei gleichem Benetzungsbild:

Da die Benetzung von hochhydrophilen Oberflächen mit Wasser auf hydrophob wirkende Verunreinigungen sehr empfindlich reagiert, sagt die Schlieren- und Tropfenbildung noch nichts über den Verunreinigungsgrad der entsprechenden Oberfläche aus. Es kann durchaus sein, daß unterschiedliche Verschmutzungsgrade, visuell betrachtet, zu gleichen Benetzungsbildern führen

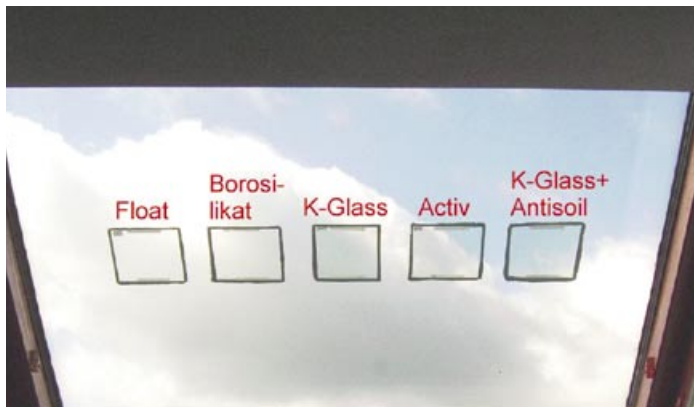


Bild 1: Die Versuchsanordnung der zweiten Versuchsserie



Bild 2: Taubeschlagsituation während der zweiten Versuchsserie bei hoher Außenluftfeuchtigkeit

durch abgelagerten Bewitterungsschmutz das thermische Emissionsvermögen der Schichten fast nicht beeinflusst wird, da dieser Schmutz im Infraroten nahezu transparent ist. Der Effekt der Beschlagfreiheit ist also bei Oberflächen mit hinreichend niedrigem thermischen Emissionsvermögen gegenüber Bewitterungsschmutz nachhaltig [5].

Warum werden die Scheiben bei Taubeschlag transluzent?

Die Ursache ist, daß die Luftfeuchtigkeit auf der Oberfläche in Form von Tröpfchen kondensiert, an denen das einfallende Licht gestreut wird, was die Durchsicht behindert. Die Tröpfchen sind zu Beginn

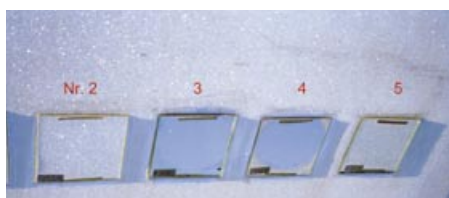


Bild 3: Reifbeschlagsituation bei der ersten Versuchsserie: Nr. 2 Floatglasscheibe bzw. Nr. 3 „K-Glass“- , Nr. 4 „K-Glass-S“- sowie Nr. 5 und 5a „Activ“-Scheibe jeweils mit der Schicht zum Außenraum

des Taubeschlags sehr klein. Deshalb sieht Taubeschlag in Transmission und Reflexion auch weiß aus, wenn er nicht allzu dick ist. Bei länger andauerndem Taubeschlag bilden sich jedoch größere Tropfen, die schließlich in Rinnsalen ablaufen, wobei die Transluzenz weitgehend erhalten bleibt, die weiße Färbung jedoch nicht.

Die „Activ“-Schicht ist sehr hydrophil; Kontaktwinkel gegen Wasser unter 5° sollen nach UV-Bestrahlung laut Herstellerangabe üblich sein und wurden auch von neutraler Stelle bestätigt. Ich habe mich

deshalb sehr gewundert, daß bei diesen Scheiben sowohl während der ersten als auch zweiten Versuchsserie bei Taubeschlag nie eine klare Durchsicht, d. h. Transparenz zu beobachten war. Erwartet habe ich bei diesen kleinen Kontaktwinkeln, daß die bei Taubeschlag sich bildenden Tröpfchen auf der „Activ“-Schicht spontan spreiten und somit Transparenz gewährleistet bleibt. Dies wird in der Literatur [6] auch so beschrieben. Ich will nicht ausschließen, daß Transparenz bei der hochhydrophilen „Activ“-Schicht bei Taubeschlag beobachtet werden kann. Bilder, die das beweisen, wurden mir zur Verfügung gestellt.

Dazu muß aber m. E. die „Activ“-Oberfläche sehr sauber sein und das ist im Außenraum längerfristig nicht möglich. Kondensation von Luftfeuchtigkeit auf Oberflächen findet – wie auch Reifbeschlag – u. a. bevorzugt an abgelagerten Aerosol-Partikeln [5, 7] statt. Diese sind in der Außenluft immer vorhanden und befallen jede Oberfläche nach kurzer Zeit. Die Lichtstreuung an den so abgeschiedenen Kondensatströpfchen hat, wie oben schon dargelegt, den Übergang von Transparenz zu Transluzenz zur Folge. Das in der Literatur dargestellte Spreiten des kondensierten Wassers auf photokatalytischen TiO_2 -Schichten (erkennbar an verbleibender hoher Transparenz der Scheiben) ist zwar unter sauberen Laborbedingungen möglich, bei Exposition im Außenraum jedoch nicht nachhaltig.

Das gleiche transluzente Benetzungsbild bei den unterschiedlichen Scheiben im Bild 2 im Falle von Taubeschlag ist weiterhin ein Hinweis dafür, daß die Kondensation in Form von Tröpfchen an abgelagerten Aerosol-Partikeln bei allen Oberflächen, d. h. von hochhydrophil („Activ“-Scheibe) bis hochhydrophob („K-Glass“ + „Antisoil“-Abdeckschicht) in gleicher Weise erfolgt. Kondensation in Form von Tröpfchen dominiert also im Fall von Taubeschlag im

Außenraum das Benetzungsverhalten einer jeden Verglasung; die Oberflächenenergie der Verglasung spielt bei der Benetzung durch Taubeschlag offensichtlich nur eine untergeordnete Rolle.

Das Taubeschlagverhalten der exponierten Scheiben der ersten Versuchsserie entsprach exakt dem der zweiten Serie. Zwischen Luft- und Badseite der exponierten Floatscheiben wurden keine Unterschiede festgestellt.

Verhalten bei Reifbeschlag

Hier zeigt sich bei beiden Versuchsserien das gleiche Verhalten wie bei den Taubeschlagsituationen (Bild 3). Die Oberflächen mit einem thermischen Emissionsvermögen über 0,80 (Float-, Borosilikat- und „Activ“-Scheiben) sind beschlagen, die mit dem thermischen Emissionsvermögen von 0,17 („K-Glass“ und „K-Glass“ mit hydrophober Abdeckschicht) hingegen bei nicht allzu hoher relativer Luftfeuchtigkeit nicht. Dies verwundert auch nicht, da Tau- und Reifbeschlag die gleiche Voraussetzung $t_0 \leq t_{\text{tau}}$ haben. Wichtig ist, daß für die relativ seltenen Fälle, wenn bei hoher Luftfeuchtigkeit Reifbeschlag auch bei den „K-Glass“-Scheiben beobachtet wurde, dieser sich im Aussehen, wie auch beim Taubeschlag, nicht von dem der übrigen exponierten Scheiben unterschied.

Die weiße Farbe des Reifbeschlags in Reflexion und Transmission rührt daher, daß Licht wie beim Schnee an kleinen, ungeordneten Eiskriställchen nahezu gleichmäßig gestreut wird. Diese entstehen dadurch, daß Luftfeuchtigkeit wiederum bevorzugt an aus der Außenluft abgelagerten Aerosol-Partikeln kondensiert; wegen $t_0 \leq 0^\circ\text{C}$ bilden sich jedoch Eiskriställchen. Da sich Reifbeschlag bei allen exponierten Scheiben von hochhydrophil bis hochhydrophob gleich ausbildete, kann auch hier geschlossen werden, daß die Oberflächenenergie der Verglasung bei

Reifbeschlag im Außenraum nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Bei Reifbildung kann im Gegensatz zum Tau- beschlag weiterhin das Phänomen auftreten, daß er nicht vollflächig ist. Dies ist bei tiefen Temperaturen (z. B. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) zu beobachten, wenn die relative Luftfeuchtigkeit sehr niedrig ist. Die blauen Streifen im Bild 3 rechts neben den Proben rühren vom Schattenwurf an den Scheibenkanten frühmorgens bei streifendem Einfall des Sonnenlichtes her. Es scheint dann an diesen Stellen durch die fehlende Lichtstreuung die Himmelsbläue durch den Reifbeschlag hindurch. Das gleiche Phänomen ist auch bei verschmutzten Windschutzscheiben zu beobachten: Bei diffusem Lichteinfall sind sie nahezu durchsichtig, bei Sonnenbestrahlung werden sie in Folge Lichtstreuung transluzent.

Verhalten bei Regen

Hier zeigte sich im Gegensatz zum Tau- und Reifbeschlag ein unterschiedliches Benetzungsverhalten bei der exponierten Floatglas-, Borosilikat-, „K-Glass“- sowie

der „K-Glass“-Scheibe mit hydrophober „Antisoil“-Abdeckschicht im Vergleich zur „Activ“-Scheibe. Bei der zuerst genannten Scheiben-Gruppe zeigte sich über den Expositionszeitraum bei Regen nahezu immer die gleiche tropfen- bis schlierenförmige Benetzung, wobei sich im Falle von tropfenförmiger Benetzung auf der hydrophoben Oberfläche infolge des größeren Kontaktwinkels der Oberfläche gegenüber Wasser stets etwas größere Tropfen bildeten. Bei anhaltendem Regen vereinigten sich Tropfen und flossen in Rinnsalen ab. Auffallend war, daß sich bei dieser Scheibengruppe das Benetzungsbild mit der Niederschlagsmenge änderte; bei steigender Niederschlagsmenge wurde die Tropfendichte höher und ging schließlich in Schlieren über.

Demgegenüber waren über den Expositionszeitraum bei der „Activ“-Scheibe bei Regen erhebliche Veränderungen des Benetzungsbildes festzustellen. Zu Beginn der Exposition blieb die „Activ“-Oberfläche auch bei länger anhaltendem Regen gleichmäßig transparent, d. h. das Regenwasser spreitete. Nach einigen Tagen (Bild 4) waren bei Regen jedoch schon

kleine Tropfen zu erkennen, die sich offensichtlich an festhaftenden Verunreinigungskeimen auf der Oberfläche bildeten (Bild 5).

Wiederum einige Zeit später spreitete das Regenwasser auf der Oberfläche nicht mehr gleichmäßig, sondern es waren während des Regens Wasserschlieren zu sehen, die auch nach dem Regen erhalten blieben. Nach etwa 3 Monaten Expositionszeit bildeten sich schließlich auf der gesamten „Activ“-Oberfläche auch Tropfen bzw. bei starkem Regen Schlieren, visuell beurteilt vergleichbar mit denen auf der Float-, „K-Glass“- und Borosilikatglasoberfläche. Diese blieben auch nach Regen bis zur Abtrocknung der Oberfläche erhalten.



Bild 4: Benetzungsverhalten während der zweiten Versuchsserie bei Regen nach einigen Tagen Exposition

Das Benetzungsverhalten von Verglasungen bei Regen deutet sich wie folgt: Während bei der Float-, Borosilikat- und den beiden „K-Glass“-Scheiben (mit und ohne hydrophobe Abdeckschicht) das Benetzungsverhalten über den Expositionszeitraum im wesentlichen durch deren mittlere bis niedrige Oberflächenenergie und die Niederschlagsmenge bestimmt wird – der Einfluß der abgelagerten Aerosol-Partikel ordnet sich quasi in den Einfluß der Oberflächenenergie ein –, gilt dies für die „Activ“-Scheiben mit sehr hoher Oberflächenenergie nur zu Beginn der Exposition. Daß dies im letzteren Fall so ist, liegt im wesentlichen daran, daß die auf der „Activ“-Schicht abgelagerten und die Oberflächenenergie vermindernenden Aerosol-Partikel zu Beginn der Exposition durch den Regen weggeschwemmt werden und somit die niedrige Oberflächenenergie der „Activ“-Schicht das Benetzungsverhalten ausschließlich bestimmt. Mit fortschreitender Expositionszeit verringert sich aber die Oberflächenenergie der „Activ“-Schicht kontinuierlich, weil Aerosol-Partikel fortschreitend auf der Schicht haften bleiben. Die Oberflächenenergie

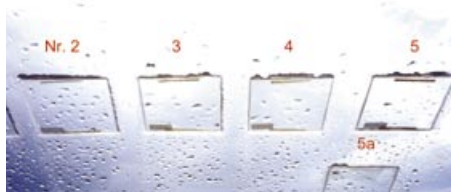


Bild 6: Situation bei Benetzung durch Regen nach etwa 3 Monaten Exposition während der ersten Versuchsserie: Nr. 2 Floatglasscheibe bzw. Nr. 3 K-Glass-, Nr. 4 K-Glass-S- sowie Nr. 5 und 5a „Activ“-Scheibe jeweils mit der Schicht zum Außenraum

der „Activ“-Schicht nimmt so kontinuierlich ab, sie wird hydrophober, was auch durch den photokatalytische Effekte dieser Schicht nicht mehr kompensiert werden kann. Mit fortschreitender Expositionszeit bilden sich so bei Regen auf der „Activ“-Schicht zuerst Schlieren, dann aber auch Tropfen. Anzumerken ist jedoch, das nach Trockenheit zu Beginn des Regens das Benetzungsverhalten der „Activ“-Scheibe wechselhaft (nahezu klare Durchsicht bis tröpfchenförmig) sein kann, was offensichtlich mit unterschiedlicher Aerosol-Partikel-Ablagerung während der Trockenheit zusammenhängt. Da die Benetzung von hochhydrophilen Oberflächen mit Wasser auf hydrophob wirkende Verunreinigungen sehr empfindlich reagiert, sagt die Schlieren- und Tropfenbildung noch nichts über den Verunreinigungsgrad der „Activ“-Oberfläche aus. Zweifelsfrei ist aber, daß die Tropfen- und

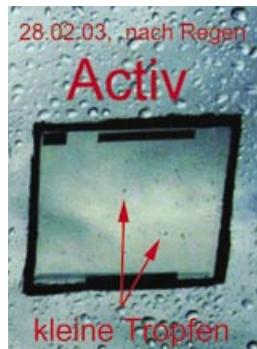


Bild 5: Tröpfchenbildung auf der „Activ“-Scheibe nach einigen Tagen Exposition

Schlierenbildung bei Regen bei fortschreitender Expositionszeit auf anhaftende Verunreinigung auf der „Activ“-Oberfläche beruht, bewirkt durch Aerosol-Partikelablagerung auf der „Activ“-Schicht.

Die gleichen Beobachtungen bzgl. Benetzung mit fortschreitender Expositionszeit während und nach Regen wurden auch bei den „Activ“-Proben der ersten Versuchsserie gemacht (Bild 6).

Es fiel weiterhin auf, daß die „K-Glass“- und „Activ“-Oberfläche nach Regen infolge der größeren solaren Absorption der Scheiben schneller abtrockneten als die Float- und Borosilikatglasoberfläche. Die Oberfläche der „K-Glass“-Scheibe mit hydrophober Abdeckschicht trocknete wegen der großen Tropfen am langsamsten ab.

Gewonnene Erkenntnisse

1. Bei Tau- und Reifbeslag kondensiert Luftfeuchtigkeit in Form von Wassertropfen bzw. Eiskriställchen bei allen Verglasungen mit und ohne Schicht bevorzugt an abgelagerten Aerosol-Partikeln. Die Kondensation ist in diesem Fall weitgehend unabhängig von der Oberflächenenergie der jeweiligen Verglasung. D. h., ob sie etwa hochhydrophil, wie beim „Activ“-Glas, oder hochhydrophob, wie beim „K-Glass“ mit „Antisoil“-Abdeckschicht ist.
2. Tau- und Reifbeslag kann bei ausreichend niedrigemittierender Oberfläche bei Gebäude- und Automobilverglasung (thermisches Emissionsvermögen $< 0,1$) vermieden werden, und dieser Effekt ist nachhaltig. D. h., er wird durch Bewitterungsschmutz quasi nicht beeinträchtigt, da dieser im Infraroten nahezu transparent ist [8].
3. Bei Benetzung durch Regen ist der Benetzungsmechanismus ein anderer als bei Tau- und Reifbeslag. Bei den Oberflächen mit mittlerer und niedriger Oberflächenenergie (Floatglas, Borosilikatglas, „K-Glass“, „K-Glass“ mit hydrophober Abdeckschicht) bleibt das Benetzungsbild

bei mit fortschreitender Expositionszeit nahezu gleich; es ändert sich lediglich bei allen diesen Scheiben mit der Niederschlagsmenge von tröpfchen- bis zu schlierenförmig. Der Einfluß der auch bei diesen Scheiben zu beobachtenden fortschreitenden Witterungsschmutzung auf das Benetzungsverhalten ordnet sich quasi in den Einfluß der Oberflächenenergie der Scheiben ein. Bei der „Activ“-Schicht mit hochhydrophiler Oberfläche (hoher Oberflächenenergie) ist dies deutlich anders. Hier wirkt sich zu Beginn der Exposition in Folge des Wegschwemmens der abgelagerten Aerosol-Partikel durch Regen die hohe Oberflächenenergie der „Activ“-Schicht auf die Benetzung voll aus. Das Regenwasser spreitet auf der Oberfläche, sie bleibt folglich transparent. Mit fortschreitender Expositionszeit wirkt sich jedoch das Anhaften von Aerosol-Partikeln auf der „Activ“-Schicht aus. Die Schicht verschmutzt und wird hydrophober, erkennbar daran, das sich zuerst Schlieren, später Tropfen auf der Oberfläche bilden.

4. Aus dem Benetzungsbild kann nicht auf den Verschmutzungsgrad der Oberfläche geschlossen werden.
5. Kontaktwinkel, gemessen nach der Herstellung der Verglasung, sagen nur sehr bedingt etwas über deren Benetzungsverhalten bei Außenbewitterung aus.
6. Trotz unterschiedlicher Randverklebung der Scheiben (mit 1K-Silikon bzw. MS-Polymer) auf der Dachfensterscheibe war bei beiden Versuchsserien visuell kein Unterschied des Benetzungsverhaltens zu beobachten. Diese Erfahrung braucht aber für andere Kleber nicht zuzutreffen. ■

Literatur:

- [1] Gläser, H. J.: Dünnfilmttechnologie auf Flachglas, Verlag Karl Hofmann, Schorndorf, 1999, Seite 36 ff
- [2] ebenda Seite 185 ff
- [3] Gläser, H. J.: Der Einfluß der Wärmeverluste bei Verglasungen durch äußere Wärmeabstrahlung und Maßnahmen zu deren Reduzierung, Bauphysik 23 (2001), Heft 1, S. 50–53
- [4] Gläser, H. J.: Dünnfilmttechnologie auf Flachglas, Verlag Karl Hofmann, Schorndorf, 1999, Seite 195
- [5] Gläser, H. J.: Von außen verschmutzte Fensterscheiben: Wie Lichteinfall geschwächt wird, glaswelt, 5/2003, S. 32–37
- [6] Rong Wang, Kazuhito Hashimoto, Akira Fujishima, Makoto Chikuni, Eiichi Kojima, Atsushi Kitamura, Mitsuhide Shimohigoshi, Toshiya Watanabe, Light-induced amphiphilic surfaces, Nature, 388 (1997), S. 431–432
- [7] www.zit.tu-darmstadt.de/lehre/umweltwissenschaften/oekologie1/Man_15.htm
- [8] Gläser, H. J., Entspricht der kV-Wert gemäß DIN noch den modernen Anforderungen?, GFF, 7/2000, Seiten 22–27